

IIII 特集：惑星科学×微小重力（惑星科学における微小重力の役割）IIII
（解説）

微小重力下での小天体表面現象

高木 靖彦

Surface Phenomena on Solar System Small Bodies

Yasuhiko TAKAGI

Abstract

Japanese Hayabusa spacecraft found some features of boulders, such as clustering, lining up and size-sorting, on asteroid (25143) Itokawa. These features might be formed by granular convection and migrations triggered by micro body impacts. We also performed impact cratering experiments in the microgravity environment using a drop tower in order to establish the scaling law on crater size. Since the result is somewhat controversial, the conclusion is still not obtained. Understanding of particle and powder behavior in the microgravity and high-vacuum environments is necessary for elucidation of these phenomena. The microgravity experiment may be a new useful method for planetary sciences to elucidate surface processes on small bodies.

Keyword(s): planetary science, granular fluidization, impact cratering, microgravity geology.

1. はじめに

太陽系の固体天体の表面上では、その天体の形成直後から現在までの間にさまざまな現象が起こり、それらによって各種の表面地形が形成され、そして進化してきました。それらの現象においては、温度や圧力などと同様に、あるいはそれ以上に重力が大きな制約条件になっていたはずですが、しかし、天体表面の現象における重力の役割に関する研究は必ずしも十分には進んでいませんでした。特に微小重力環境の天体表面進化に関する研究は、具体的な研究対象が無かったこともあり、不十分であったと考えられます。

そんな中、2005年の9月から11月にかけて、日本の探査機「はやぶさ」が25143番小惑星イトカワに接近し、様々な興味深い地形を表面上に見つけました^{1,2)}。一方、私たちのグループは、その前年より日本無重量総合研究所(MGLAB)において微小重力下でのクレーター形成実験を行っていました。

そのような背景から、私たちは2009年と2010年の2回「微小重力地質学研究会」という小研究会を開催しました。本稿では、その小研究会での中心的な話題であった砂礫移動現象と衝突クレーター形成の話題を紹介し、一見あまり関係ないように感じられる惑星科学分野の有力な研究手法に微小重力実験がなりえることを示したい

と思います。

2. 砂礫移動現象

「はやぶさ」が探査したイトカワは、S型小惑星と呼ばれるもので、元素・鉱物組成はLL5またはLL6と呼ばれるコンドライト隕石に似ていて、主にケイ酸塩鉱物で構成されています。大きさは535×294×209 mで、今までにNASAなどの探査機により探査された10個程度の小惑星の中でも最も小さいものです。小惑星近傍での探査機の運動から求められた質量と体積から計算された密度は、 $1.9 \pm 0.13 \text{ g/cm}^3$ でした。表面重力は 10^{-5} G 程度となり、落下棟実験と同等になります。したがって、表面の地形の形成には、表面重力が小さい事が大きく影響していると考えられます。

「はやぶさ」が近接撮影したイトカワ表面の画像（例えばFig. 1）は、表面がcmから数十mの大きさの固結されていない小石や岩塊で覆われていることを示しました。そして、それらの配置に関しては、

- cmサイズの小さな粒子は、ポテンシャルの低い部分に集中している。
- 岩は砂利に埋まっていない。すなわち、細かな粒子が岩塊の上には存在しない。
- 大きな岩塊は、一般的に小さな粒子より上にある。

- ・大きな岩は散在せずクラスターを形成している。
- ・大きな岩塊は、長軸が水平になるような重力的に安定な姿勢になっている。斜面では、傾斜に直行する方向に長軸が向く傾向がある。

というような特徴があることを明らかにしました。

このような特徴が実現されるためには、イトカワの全球で、粒子の対流、がけ崩れのような粒子の移動が引き起こされ、小石や岩塊の再配置があった事が考えられます。イトカワのような小天体においては、内部からの力により全球の変動が起こることは考えられないので、この変動の原因は、外部からの力、小天体の衝突による振動と考えられています。小天体の衝突により発生した振動が全球に伝播し、その振動により粒子の再配置が起こったと考えるわけです。振動が一定の強度を持って全球に伝播する点では、天体が小さいことが重要なポイントになっています。

粒径の異なる粉粒体に振動を加えると粒径の大きいものが上へ粒径の小さいものが下へ集まる現象は、ブラジルナッツ効果と呼ばれています。イトカワ表面上での岩塊の配置は、まさにブラジルナッツ効果によって形成されているように見えるものが多くあります。その振動の元が小天体の衝突とする考えは、イトカワ表面上の現象をうまく説明しているように思えます。

しかし、ブラジルナッツ効果そのものの機構は良くわかっておらず、粒子間の空気の役割が大きいという考えもあるようです。したがって、微小重力・高真空環境の小天体上で、このような現象が起こるのかは不明です。微小重力下での粉粒体の対流・移動のメカニズムを解明するための実験が必要になってくると考えられます。

3. クレーター形成過程

3.1 クレーターのスケール則

天体同士の衝突現象は、太陽系の起源と進化を支配する最も基本の現象です。それにより作られた衝突痕（衝突クレーター）も太陽系内のほとんど全ての固体天体の表面上に最も普遍的に見られる地形です。そのため、クレーターの形成過程の研究は、理論・数値実験・室内実験・惑星探査や地球上の野外調査など様々な手法を用いて数多く行われてきました。

それらの結果により、形成されるクレーターの大きさは、理論的には、

$$E = K_1 Y D^3 + K_2 \rho g D^4 \quad (1)$$

と表現されることがわかってきました³⁾。ここで、 E が衝突のエネルギー、 Y が標的物質の強度、 ρ が標的物質の密度、 g が天体表面重力、 D が形成されるクレーターの直径、 K_1 、 K_2 が係数です。右辺第一項は、標的物質の破壊に使われるエネルギーを表しています。したがっ

て、クレーターの容積と物質強度に比例しています。それに対して、第二項は、物質の摩擦に打ち勝つ標的物質を持ち上げるのに必要なエネルギーを表しています。摩擦は上に乗る物質の重量に比例するので、重力、密度、深さに比例します。したがって必要なエネルギーは、クレーター直径の4乗に比例しています。

標的が岩石のような場合は第一項が卓越し、クレーター直径は衝突エネルギーの1/3乗に比例し、強度スケールリングと呼ばれます。それに対して、標的が砂礫などの場合は第二項が卓越し、クレーター直径は衝突エネルギーの1/4乗に比例し、重力スケールリングと呼ばれます。式(1)の第2項目のみを取り出せば、

$$D \propto g^{-0.25} E^{0.25} \quad (2)$$

という関係になります。

実際、砂を標的に用いた室内実験の結果は³⁾、クレーター直径が衝突エネルギーの1/4乗に比例していて、まさに重力スケールリングを示唆しています。そこから、標的が砂などの場合は、大きさなどの条件に関わらず常に重力スケールリングになると考えられてきました。

3.2 従来の実験

上記のように、クレーター形成過程において重力の影響が大きいことは予測されていましたが、技術的な困難さから、実験により検証する研究は進んでいませんでした。見かけの重力を大きくすることは、遠心装置を使うことで可能でしたので、そのような実験は行われてきましたが、重力を小さくした実験は殆ど行われてきませんでした。

今までに行われた唯一と言ってもよい実験は、35年も

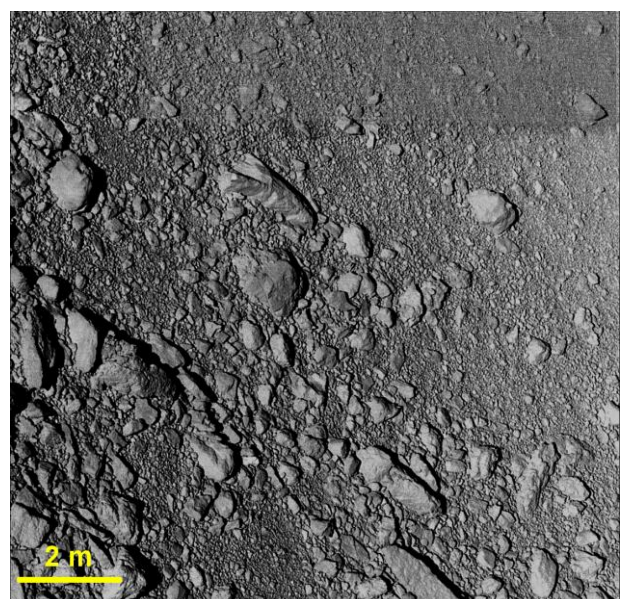


Fig. 1 Surface of asteroid (25143) Itokawa.

前に NASA で行われたものでした⁴⁾。この実験では、NASA Ames 研究所にある直径 2m 程の真空容器（この装置は衝突研究では有名で NHK などの番組にも時々出てきます）の中で標的容器をバネで吊るして落下させながら、落下のタイミングに同期させて弾丸を撃ち込み、その様子を 35mm フィルムの映画カメラ（60 コマ/秒）で撮影するというものでした。弾丸の質量は 0.064 g、衝突速度は 6.64 km/sec に固定する一方、吊るすバネのバネ定数を変えて実験を行うことで見かけの重力を変化させました。この実験では衝突エネルギーが固定されていたので、形成されるクレーターの直径 D と見かけの重力 g が、

$$D \propto g^{-0.165} \quad (3)$$

という関係を持つことを示しました。これは式 (2) の係数 -0.25 より緩やかな重力依存性を示すものでした。その理由として、物質強度すなわち式 (1) の第 1 項の影響が小さいけれども無視できないためと、この論文の中で解釈されていました。

より最近のものとしては、スペースシャトルの相乗り（ヒッチハイク）ペイロードの中で、6 回の衝突実験が行われました⁵⁾。この実験では、10 g 程度の質量の弾丸が、石英砂または月レゴリス模擬物質に向かってばねの力により発射されました。しかし、衝突速度は 1 から 100 cm/sec と非常に遅く、クレーターの直径が計られたもの

も 2 つしかなかったので、クレーター形成過程に対する重力の影響を評価するためには有効なものとはなりませんでした。

3.3 MGLAB での実験

この実験は、「はやぶさ」のサンプル採取装置の微小重力実験⁶⁾を行うなかで、微小重力実験がクレーター形成過程の研究にも使えるのではないかという発想から始まりました。

実験を始めるにあたって、航空機実験と落下塔実験の比較を行いました。以下のような理由で落下塔実験の方がこの実験には適していると判断しました。

- 火薬を使うため、航空機実験では手続きが煩雑になってしまう（「はやぶさ」サンプラーの実験を航空機で行ったことがある⁷⁾ので不可能ではありません）。
- 1 回弾丸を発射するごとに標的のセットアップをしないおため実験装置を分解しなければならず、1 フライトで 10 回程度の微小重力環境が実現できる航空機実験のメリットを活かせない。それどころか、1 日に 1 回しか実験ができないことになり効率的ではない。
- 現象そのものは 1~2 秒以下で終了するので、継続時間は落下塔実験で十分である。

実験は MGLAB の落下カプセルの中に真空容器を置き (Fig. 2)、その中に小型の火薬銃と標的をセット (Fig. 3) して行いました。これから装置は、基本的部分は「はやぶさ」のサンプル採集装置の実験で用いたものを利用しました。

火薬銃は「はやぶさ」サンプラーの弾丸発射装置と同じ設計のものです。銃身の長さ 10 cm 程度の小型なものですが、「はやぶさ」では 5 g の弾丸を 300 m/sec で発射する予定でした。この実験では、4 g ほどのサボと呼ばれるアルミの円筒の先に 0.5 g 以下の球形の弾丸を付け、弾丸のみが標的に衝突するようにしました。サボは、銃身の先頭付近で止まって火薬の燃焼ガスがクレーター形成

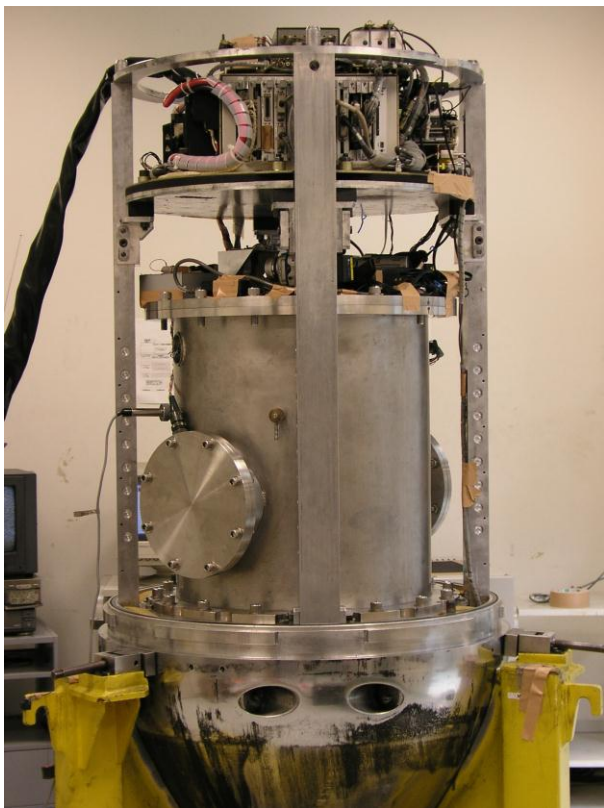


Fig. 2 Vacuum chamber on an MGLAB capsule.

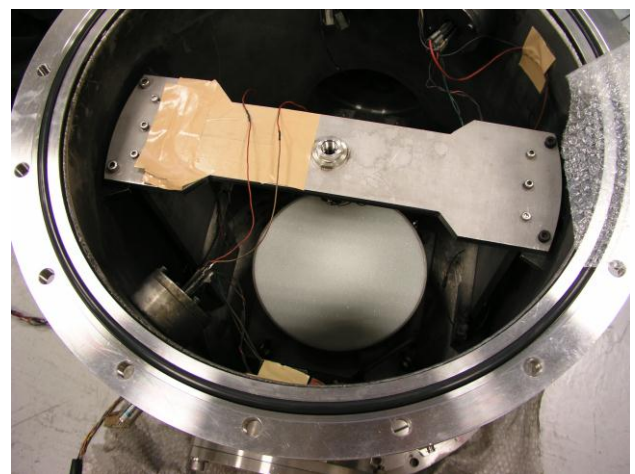


Fig. 3 Small powder gun and target in the chamber.

Table 1 Experimental conditions.

Target Material	Glass Beads, Quartz Sand
Target Density	1540 - 1565 kg/m ³
Particle Size of Target	75 - 225 μm
Projectile Material	Nylon, Aluminum, Stainless Steel
Projectile Density	1150 - 7815 kg/m ³
Impact Velocity	45 - 360 m/sec
Projectile Mass	5 - 509 mg
Kinetic Energy	0.0055 - 30.8 Joule
Impact Angle	73 or 90 °

を乱さないようにしました。カプセルのコントローラーからの信号により、落下 0.5 秒後に発射装置が点火玉に通電して火薬が燃焼し弾丸が発射されるようにしました。

標的には、ガラスビーズおよびイリノイ産の石英砂を用い、よく乾燥された後、直径 20 cm、深さ 15 cm の円筒形の容器に入れました。その後、容器の側面を木製ハンマーで殴打して一定の圧密状態にしました。殴打する回数を一定にする事により圧密度の再現性は実現されていたと考えています。その後、標的物質の入った容器をチャンバーの底に固定しました (Fig. 3)。

使用した弾丸・標的の密度、衝突速度などの実験条件は Table 1 にまとめてあります。

衝突により形成されたクレーターは、カプセルが停止する時の大きな加速度により崩れてしまいますので、衝突の様子は落下中に 30 コマ/秒のデジタルビデオで撮影をし、その画像から大きさ等を測定しました。Fig. 4 に撮影された画像の一例を示します。

比較のための 1G での実験は、同じ装置を JAXA 相模原キャンパスの実験室に置いた状態で行いました。

得られた結果は、Fig. 5 に示します。この図では、中塗りの記号が落下塔での実験結果を、白抜きの記号が 1G での比較実験を示しています。各種の記号と色は使われた弾丸と標的の組合せの違いを表しています。

この図に示された結果からは、

- ・全体としてクレーター直径が衝突エネルギーの 1/4 条に比例する関係になっていて、理論的な重力スケールリングと一致している。
- ・しかし、同じ衝突エネルギーで形成されるクレーター直径に微小重力と 1G でほとんど違いが見られない。
- ・同じ衝突エネルギーでも、弾丸がナイロン、アルミニウム、ステンレス鋼と密度が高くなるにしたがって、形成されるクレーターの直径も大きくなる。
- ・標的に石英砂を用いた場合はガラスビーズを用いた場合よりも同じ衝突エネルギーで形成されたクレーター直径は僅かに小さい。

という傾向が見てとれます。そこで、弾丸の運動エネルギー E (Joule)、弾丸/標的の密度比 ρ_p/ρ_t 、重力 g を独立変数として、形成されたクレーター直径 D (mm) に対する多重回帰分析を、標的がガラスビーズの場合と、石英砂の場合を分けて行いました。ただし、MGLAB の実験では、カプセル搭載の加速度計のダイナミックレンジが小さいために厳密な重力が不明なので、一律に $10^{-5} G$ として計算しました。

その結果は、標的がガラスビーズの場合は、

$$D = 10^{1.77 \pm 0.01} E^{0.26 \pm 0.01} (\rho_p/\rho_t)^{0.11 \pm 0.02} g^{0.004 \pm 0.003} \quad (4)$$

標的が石英砂の場合は、

$$D = 10^{1.66 \pm 0.02} E^{0.19 \pm 0.01} (\rho_p/\rho_t)^{0.02 \pm 0.04} g^{-0.003 \pm 0.003} \quad (5)$$

となりました。

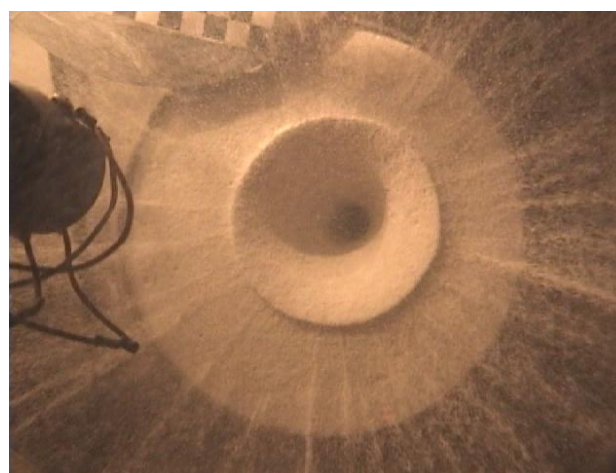
いずれの場合も重力に対する指数はほぼ 0 であり、形成されクレーター直径に重力は影響していないことが明らかです。しかし、標的がガラスビーズの場合のエネルギー依存項の指数は、重力スケールリングの理論的な予測値 0.25 になっています。

標的に石英砂を用いた場合にガラスビーズを用いた場合よりもクレーター直径が全体的に小さくなるのは、石英砂の方が粒子の形状が不規則で粒子間の摩擦が大きいことに原因すると考えられます。しかし、石英砂の場合にエネルギー依存項の指数が重力スケールリングより有意に小さくなっている原因は、明らかではありません。

3.4 実験結果の評価

今回の実験結果は、理論的な予測 (式 (2)) や過去の実験結果 (式 (3)) と大きく異なるものとなったため、内外の研究者からは多くの批判的な疑問・意見が出されることになりました。

最初に出たのは、「衝突後の微小重力継続時間が短い

**Fig. 4** A sample frame of videos

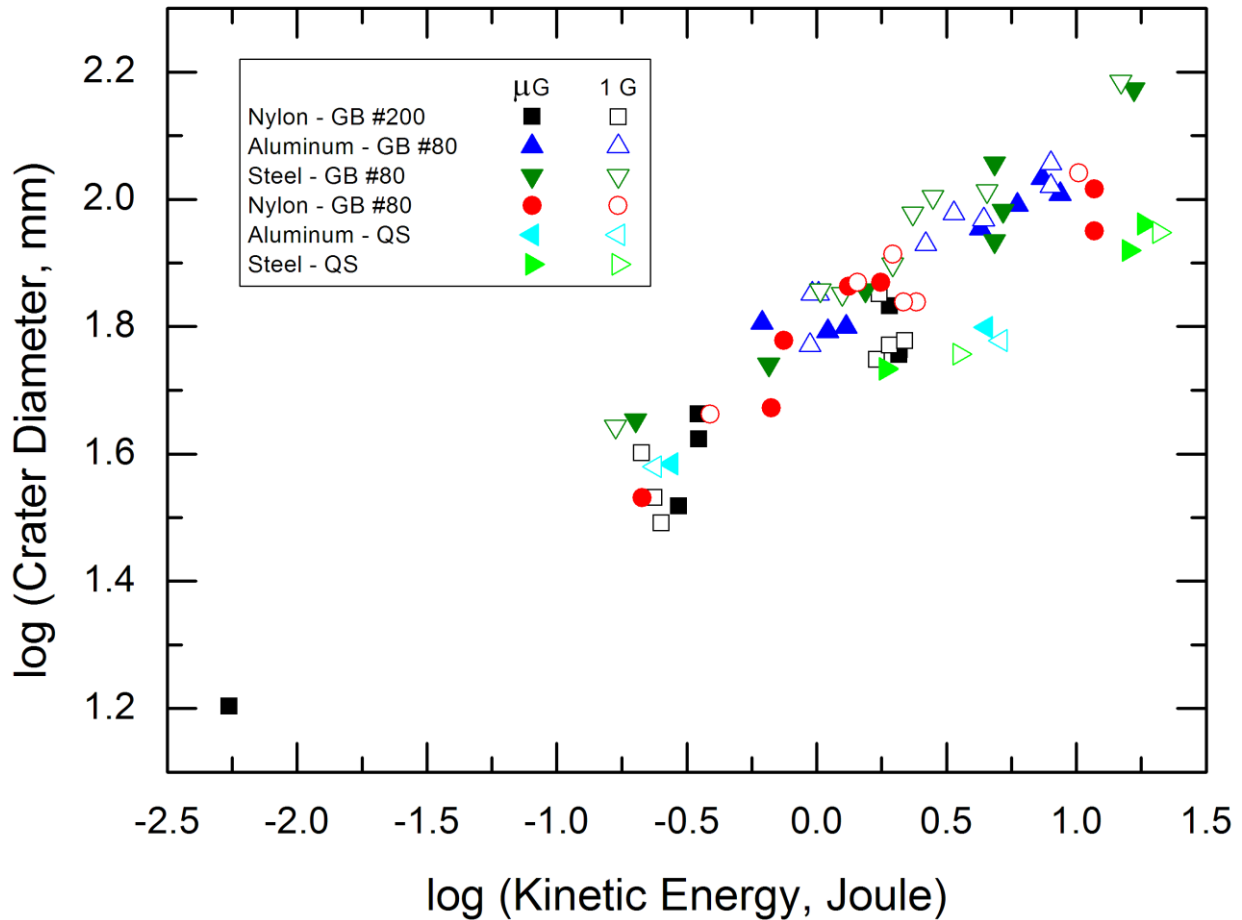


Fig. 5 Variation of crater diameter with projectile kinetic energy.

ではないのか、もっと時間をかければクレーターはゆっくりと成長する」というものでした。しかし、ビデオ画像をみるかぎり、クレーターの成長が衝突後 1 秒程度で終了していることは明確で、この意見は正しくないといえます。

次に出てきた強い指摘の一つは、「1 G の記憶が残っている」、すなわち、「衝突前の微小重力状態の時間が短い」というものです。微小重力環境であるべき粒子状態になる前に衝突が起こっているのではないかと、いうものです。この指摘に対しては、データに基づき反論することができていないのが現状です。

いずれにしろ、今回の実験結果を評価するうえでの一番の疑問点は、なぜ NASA Ames 研究所での実験⁴⁾と全く異なる結果になったかという点です。残念ながら、この論文は雑誌に載ったものではなく書籍の一つの章なので、実験条件等が必ずしも詳細には記述されていません。したがって、厳密な比較はできないのですが、衝突前後の時間は今回の実験と同程度と想像されます。したがって、今回の実験だけが特に 1 G の時の状態を保持したまま衝突が起こったという事はなさそうです。

一つ違いがあるのは、Ames の実験で使われた石英砂（産地は今回使ったものと同じイリノイ州 Otawa）の平均粒径が 350 μm で 500 μm 以上の砂粒も含まれていたのに対して、今回使った標的はガラスビーズにしても石英砂にしても平均粒径が 225 μm 以下で良くふるいわけされていたことです。この粒径の違いにより、NASA Ames 研究所での実験では標的が直ちに小重力下の状態になったのに対して、我々の実験では粒子間の固着あるいは摩擦が強く残ったままになった可能性はあります。

4. 惑星科学の新たな研究手段として

砂礫移動現象にしてもクレーター形成過程にしても、小天体上での振舞いを正しく理解するためには、粒子間の固着あるいは摩擦が微小重力・高真空下でどのようになるかを解明する必要があることが、様々な議論から明らかになってきました。しかし、このような極端な環境における粉粒体の振る舞いに関しては、粉体工学などの分野においてはほとんど研究されてきていないようです。惑星科学自身の課題であると認識して研究していく必要があるでしょう。

その際には微小重力実験が有力な研究手段の一つとなると考えています。“比較的”手軽に実験のできる日本無重量総合研究所が廃止されてしまったのは残念ではありますが、微小重力環境下でのクレーター形成実験により、微小重力実験が惑星科学の分野でも研究手段となりうる事を示すことができたと考えます。

微小重力・高真空環境下での粉粒体の挙動を解明するためには、より長時間の微小重力環境での実験が必要になると考えられます。軌道実験をも視野に入れた研究計画というものが求められるかもしれません。そのなかでは微小重力環境下でのクレーター形成実験の経験というものが役立つものと期待しています。

微小重力科学、粉体工学、惑星科学の融合から小天体上の様々な現象の過程が明らかになってくれば、その中から小天体の進化に関する新たな知見も得られることが期待されます。地球などの惑星は、小天体が合体集積して形成されたものですから、小天体表面進化に関する新たな知見は、太陽系の起源・進化に関する新たな知見にも繋がるものとなるでしょう。

謝辞

本稿の一部は、2回開かれた「微小重力地質学研究会」での議論を基にしています。参加して議論をしていただいた方に感謝します。微小重力実験は、(財)日本宇宙フォーラムが推進していた「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行われました。実験

に協力いただきました MGLAB の職員の方々に深く感謝します。

参考文献

- 1) A. Fujiwara, J. Kawaguchi, D. K. Yeomans, M. Abe, T. Mukai, T. Okada, J. Saito, H. Yano, M. Yoshikawa, D. J. Scheeres, O. Barnouin-Jha, A. F. Cheng, H. Demura, R. W. Gaskell, N. Hirata, H. Ikeda, T. Kominato, H. Miyamoto, A. M. Nakamura, R. Nakamura, S. Sasaki and K. Uesugi: *Science* **312** (2006), 1330.
- 2) H. Miyamoto, H. Yano, D. J. Scheeres, S. Abe, O. Barnouin-Jha, A. F. Cheng, H. Demura, R. W. Gaskell, N. Hirata, M. Ishiguro, T. Michikami, A. M. Nakamura, R. Nakamura, J. Saito and S. Sasaki: *Science* **316** (2007) 1011.
- 3) H. Mizutani, S. Kawakami, Y. Takagi, M. Kato and M. Kumazawa: *J. Geophys. Res.*, **88** (1983), supplement, A835-A845.
- 4) D. E. Gault and J. A. Wedekind: *Impact and Exploration Cratering*, ed. D. J. Roddy, R. O. Pepin and R. B. Merrill, pp.1231-1244, Pergamon, New York, 1977.
- 5) J. E. Colwell: *Icarus* **164** (2003), 188.
- 6) H. Yano, T. Kubota, H. Miyamoto, T. Okada, D. Scheeres, Y. Takagi, K. Yoshida, M. Abe, S. Abe, O. Barnouin-Jha, A. Fujiwara, S. Hasegawa, T. Hashimoto, M. Ishiguro, M. Kato, J. Kawaguchi, T. Mukai, J. Saito, S. Sasaki, M. Yoshikawa: *Science*, **312** (2006), 1350.
- 7) A. Fujiwara, M. Abe, S. Hasegawa, T. Shimada, N. Onose, H. Yano, K. Higuchi, H. Sawai, J. Kawaguchi, S. Takagi, Y. Takagi, K. Takayama, S. Nonaka, K. Okamoto, C. Miwa, T. Okudaira, A. Yajima: *JASMA*, **17** (2000) 178.

(2012年9月11日受理)